

Description

Titre de l'invention : DISPOSITIF ET PROCÉDÉ POUR LA CAPTURE ET LE STOCKAGE DE DIOXYDE DE CARBONE ATMOSPHÉRIQUE

L'invention se rapporte à un dispositif et un procédé pour la capture et le stockage de dioxyde de carbone atmosphérique.

L'activité humaine a augmenté la concentration de dioxyde de carbone (CO₂) dans l'atmosphère. En particulier, l'utilisation des énergies fossiles, telles que le pétrole, le gaz ou le charbon, mais également la déforestation ainsi que les activités de cimenteries sont des causes de cette augmentation.

L'accumulation du CO₂ induite par les activités humaines contribue pour environ 2/3 de l'augmentation dans l'atmosphère de l'effet de serre. C'est pourquoi on mesure classiquement l'effet des autres gaz à effet de serre en équivalent CO₂. On admet ainsi que l'augmentation de la concentration CO₂ équivaut à l'augmentation des concentrations de gaz à effet de serre dans l'atmosphère en général. Cette augmentation accentue le réchauffement de notre planète.

Aujourd'hui, la concentration en dioxyde de carbone mesurée dans l'atmosphère en 2021 s'élevait à 421 ppm. Cette concentration est drastique et notamment si l'on considère qu'au milieu du 18^{ème} siècle elle ne s'élevait qu'à environ 280 ppm. Ainsi, la concentration actuelle en CO₂ suscite l'inquiétude de nombreux scientifiques, qui soulignent les impacts négatifs sur le climat, mais aussi sur l'environnement.

Récemment, de nouvelles technologies ont été explorées pour capturer du CO₂ de l'atmosphère, et le stocker, afin d'atténuer les impacts négatifs sur notre planète. L'introduction d'alcalinité dans les océans est notamment un procédé prometteur pour le captage et le stockage du CO₂.

EP2024062 divulgue un procédé permettant de capturer du dioxyde de carbone atmosphérique au moyen de solutions alcalines NaOH.

D'autres méthodes sont envisagées tels que le minage de Trona, encore appelé tronite, ou encore sesquicarbonate de sodium dihydraté [Na₃(CO₃)(HCO₃)•2(H₂O)].

Toutefois, les techniques de l'état de l'art ne sont pas satisfaisantes, notamment en ce que le bilan CO_2 n'est pas efficace pour envisager une application pour l'atténuation du réchauffement climatique à grande échelle. De plus, la mise à disposition de solutions alcalines est généralement difficile, et les méthodes de minage sont limitées en matières premières et génèrent des polluants (notamment en raison du besoin de transport).

La présente invention vient améliorer la situation.

Ainsi, l'invention vient introduire un procédé pour la capture de dioxyde de carbone [CO_2] atmosphérique. Le procédé de l'invention comprend les étapes suivantes :

- i.** La mise à disposition d'un flux salin (1) et de carbonate de calcium [CaCO_3] (7);
- ii.** La production d'un flux alcalin (5) comprenant de l'hydroxyde de sodium [NaOH] ;
et
- iii.** La production d'un flux acide (6) comprenant de l'acide chlorhydrique [HCl] ;

Dans ce procédé, au moins l'une desdites étapes **ii.** de production du flux alcalin (5) et **iii.** de production du flux acide (6) comporte une étape de traitement électrochimique d'au moins une partie dudit flux salin (1).

En outre, le procédé de l'invention comprend les étapes suivantes :

- iv.** La neutralisation de l'acide chlorhydrique [HCl] obtenu à l'étape **iii.** de production d'un flux acide (6) par la mise en contact dans un réacteur acide (AR) du carbonate de calcium [CaCO_3] (7) de l'étape **i.** de mise à disposition avec ledit acide chlorhydrique [HCl] de manière à obtenir un flux liquide (8) de chlorure de calcium [CaCl_2] et un flux gazeux (9) de dioxyde de carbone [CO_2] ;
- v.** La production d'un flux de carbonate de sodium [Na_2CO_3] (10) par la mise en contact dans un réacteur basique (BR) d'au moins une partie du dioxyde de carbone [CO_2] obtenu à l'étape **iv.** de neutralisation avec l'hydroxyde de sodium [NaOH] de l'étape **ii.** de production d'un flux alcalin ; et
- vi.** Le déversage du flux de carbonate de sodium [Na_2CO_3] (10) produit à l'étape précédente **v.** dans une eau saline choisie parmi une eau de mer et une eau océanique, de sorte à augmenter son alcalinité et ainsi provoquer la capture du dioxyde de carbone [CO_2] atmosphérique.

Dans un mode de réalisation, la mise à disposition du flux salin de l'étape **i.** est réalisée par le puisage dans une eau choisie parmi une eau de mer et une eau océanique.

Dans un mode de réalisation préférentiel, le traitement électrochimique est choisie parmi le groupe constitué d'une électrodialyse et électrolyse chlore-alcali.

Dans un autre mode de réalisation préférentiel, l'étape **iv.** de neutralisation de l'acide chlorhydrique [HCl] comprend en outre la collecte du flux liquide (8) de chlorure de calcium [CaCl₂].

Dans un autre mode de réalisation préférentiel, le procédé comprend en outre, en amont desdites étapes **ii.** de production d'un flux alcalin (5) et **iii.** de production d'un flux acide (6), les étapes suivantes :

i.1. Une osmose inverse (RO) pour dessaler ledit flux salin (1) et ainsi obtenir un flux d'eau dessalée (1') d'une part, et un flux d'eau concentrée en sels (2) d'autre part ; et

i.2. Une purification (F), de préférence choisie parmi une filtration et une précipitation, recevant au moins une partie dudit flux d'eau concentrée en sels (2) issue de l'osmose inverse (RO), dans laquelle on élimine des ions Mg²⁺ et Ca²⁺ du flux d'eau concentrée en sels (2) et ainsi obtenir un flux d'eau purifiée essentiellement dépourvue d'ions Mg²⁺ et Ca²⁺ (2').

Dans un autre mode de réalisation préférentiel, le procédé comprend en outre, en amont desdites étapes **ii.** de production d'un flux alcalin (5) et **iii.** de production d'un flux acide (6), les étapes suivantes :

i.3. Une mise à disposition d'un flux d'eau purifiée essentiellement dépourvue d'ions Mg²⁺ et Ca²⁺ (2'), et

i.4. Une électrodialyse dans laquelle ledit flux d'eau purifiée essentiellement dépourvue d'ions Mg²⁺ et Ca²⁺ (2') est soumis à au moins un champ électrique de sorte à produire ledit flux alcalin (5) et ledit flux acide (6) des étapes **ii.** de production d'un flux alcalin (5) et **iii.** de production d'un flux acide (6). Dans ce mode de réalisation, le procédé peut en outre comprendre, en amont de l'étape **i.4.** d'électrodialyse :

i.5. Une mise à disposition d'un flux d'eau dessalée (1', 11), de préférence un flux d'eau dessalée filtrée (1''), également soumis audit champ électrique lors de l'électrodialyse de sorte à contribuer à la production dudit flux alcalin (5) et dudit flux acide (6) des étapes **ii.** de production d'un flux alcalin (5) et **iii.** de production d'un flux acide (6).

En variante, le procédé de l'invention peut comprendre en outre, en amont desdites étapes **ii.** de production d'un flux alcalin (5) et **iii.** de production d'un flux acide :

i.6. Une purification (F), de préférence choisie parmi une filtration et une précipitation, recevant ledit d'un flux salin (1), dans laquelle on élimine des ions Mg^{2+} et Ca^{2+} dudit d'un flux salin (1) et ainsi obtenir un flux d'eau purifiée essentiellement dépourvue d'ions Mg^{2+} et Ca^{2+} (2') ;

i.7. Une électrodialyse dans laquelle ledit flux d'eau purifiée essentiellement dépourvue d'ions Mg^{2+} et Ca^{2+} (2'), et de préférence un flux d'eau dessalée (11), est/sont soumis à au moins un champ électrique de sorte à produire ledit flux alcalin (5) et ledit flux acide (6) des étapes **ii.** de production d'un flux alcalin (5) et **iii.** de production d'un flux acide (6).

Dans une autre variante du procédé de l'invention, celui-ci peut comprendre en outre, en amont desdites étapes **ii.** de production d'un flux alcalin (5) et **iii.** de production d'un flux acide :

i.8. Une osmose inverse (RO) pour dessaler ledit flux salin (1) et ainsi obtenir un flux d'eau dessalée (1') d'une part, et un flux d'eau concentrée en sels (2) d'autre part ;
et

i.9. Une électrodialyse dans laquelle ledit flux d'eau dessalée (1') et ledit flux d'eau concentrée en sels (2) sont soumis à au moins un champ électrique de sorte à produire ledit flux alcalin (5) et ledit flux acide (6) des étapes **ii.** de production d'un flux alcalin (5) et **iii.** de production d'un flux acide (6).

Dans des modes de réalisation, l'électrodialyse produit en outre un flux partiellement dessalé (4) lequel est soumis à une deuxième électrodialyse de sorte à contribuer à la production dudit flux alcalin (5) et dudit flux acide (6) des étapes **ii.** de production d'un flux alcalin (5) et **iii.** de production d'un flux acide (6).

Dans une autre variante, l'étape **ii.** de production d'un flux alcalin (5) du procédé de l'invention comprend :

- une électrolyse chlore-alcali (C-A) de sorte à produire le flux alcalin comprenant de l'hydroxyde de sodium [NaOH] (5), un flux gazeux de dihydrogène [H₂] (13), et un flux gazeux de chlore [Cl₂] (14) ;

et dans lequel l'étape **iii.** de production d'un flux acide (6) comprend

- une injection dans une cellule à carburant H₂/Cl₂ (FC) dudit flux gazeux de dihydrogène [H₂] (13), et dudit flux gazeux de chlore [Cl₂] (14) de sorte à obtenir un flux concentré d'acide (15) comprenant de l'acide chlorhydrique [HCl], et de l'électricité et/ou de la chaleur ; et
- un mélange dans une cuve de dilution (D) dudit flux concentré d'acide (15) avec un liquide, de préférence un liquide salin (16), de sorte à obtenir le flux acide (6) comprenant de l'acide chlorhydrique [HCl].

La présente invention vise en outre un dispositif pour la capture de dioxyde de carbone [CO₂] atmosphérique comprenant un moyen de puisage d'un flux salin (1), de préférence une eau de mer ou océanique, et un moyen d'apport de carbonate de calcium [CaCO₃] (7). Le dispositif comporte en outre

- une unité de traitement électrochimique (ED, U-CA) apte à produire à partir d'au moins une partie dudit flux salin (1) :
 - o un flux alcalin (5) comprenant de l'hydroxyde de sodium [NaOH] ; et
 - o un flux acide (6) comprenant de l'acide chlorhydrique [HCl] ;
- un réacteur acide (AR) en communication fluidique avec l'unité de traitement électrochimique (ED, U-CA) et relié au moyen d'apport de carbonate de calcium [CaCO₃] (7), pour respectivement recevoir l'acide chlorhydrique [HCl] et le carbonate de calcium [CaCO₃] (7) et les mettre en contact de sorte à neutraliser l'acide chlorhydrique [HCl] et ainsi produire un flux liquide (8) de chlorure de calcium [CaCl₂] et un flux gazeux (9) de dioxyde de carbone [CO₂] ;
- un réacteur basique (BR) en communication fluidique avec l'unité de traitement électrochimique (ED, U-CA) et avec le réacteur acide (AR), pour respectivement recevoir l'hydroxyde de sodium [NaOH] et le dioxyde de

carbone [CO₂] et les mettre en contact de sorte à produire un flux de carbonate de sodium [Na₂CO₃] (10) ; et

- un moyen de déversage dudit flux de carbonate de sodium [Na₂CO₃] (10) produit par le réacteur basique (BR) dans une eau saline choisie parmi une eau de mer et une eau océanique, de sorte à augmenter son alcalinité et ainsi provoquer la capture du dioxyde de carbone [CO₂] atmosphérique.

Dans un mode de réalisation, l'unité de traitement électrochimique (ED, U-CA) est choisie parmi le groupe constitué d'un électrodialyseur et une installation d'électrolyse chlore-alcali.

Le dispositif de l'invention peut en outre comprendre :

- une unité d'osmose inverse (RO) agencée pour recevoir le flux salin (1) de sorte à le dessaler et ainsi produire un flux d'eau dessalée (1') d'une part, et un flux d'eau concentrée en sels (2) d'autre part ; et
- une unité de purification (F) en communication fluidique avec l'unité d'osmose inverse (RO) pour recevoir au moins une partie dudit flux d'eau concentrée en sels (2) et agencée pour éliminer des ions Mg²⁺ et Ca²⁺ dudit flux d'eau concentrée en sels (2) et ainsi obtenir un flux d'eau purifiée essentiellement dépourvue d'ions Mg²⁺ et Ca²⁺ (2').

Dans un autre mode de réalisation, le dispositif comprend en outre :

- un moyen d'apport d'un flux d'eau purifiée essentiellement dépourvue d'ions Mg²⁺ et Ca²⁺ (2'), et
- l'unité de traitement électrochimique est un électrodialyseur (ED) agencé en communication fluidique avec le moyen d'apport du flux d'eau purifiée essentiellement dépourvue d'ions Mg²⁺ et Ca²⁺ (2') de sorte à soumettre ce flux (2') à au moins un champ électrique et ainsi produire ledit flux alcalin (5) et ledit flux acide (6).

Dans ce mode de réalisation, le dispositif peut comprendre :

- un moyen d'apport d'un flux d'eau dessalée (1', 11), de préférence un flux d'eau dessalée filtrée (1''), et dans lequel

- l'électrodialyseur (ED) est également agencé en communication fluide avec le moyen d'apport d'un flux d'eau dessalée (1', 11, 1'') de sorte à soumettre ce flux audit champ électrique pour produire le flux alcalin (5) et le flux acide (6).

En variante, le dispositif de l'invention peut en outre comprendre:

- une unité d'osmose inverse (RO) agencée pour recevoir le flux salin (1) de sorte à le dessaler et ainsi produire un flux d'eau dessalée (1') d'une part, et un flux d'eau concentrée en sels (2) d'autre part ; et dans lequel
- l'unité de traitement électrochimique est un électrodialyseur (ED) agencé en communication fluide avec, d'une part, au moins une partie dudit flux d'eau dessalée (1') et, d'autre part, au moins une partie dudit flux d'eau concentrée en sels (2), de sorte à les soumettre à au moins un champ électrique pour produire ledit flux alcalin (5) et ledit flux acide (6).

Dans une autre variante de l'invention, le dispositif peut comprendre en outre :

- une unité d'osmose inverse (RO) agencée pour recevoir le flux salin (1) de sorte à le dessaler et ainsi produire un flux d'eau dessalée (1') d'une part, et un flux d'eau concentrée en sels (2) d'autre part ; et
- une unité de purification (F) en communication fluide avec l'unité d'osmose inverse (RO) pour recevoir au moins une partie dudit flux d'eau concentrée en sels (2) et agencée pour éliminer des ions Mg^{2+} et Ca^{2+} dudit flux d'eau concentrée en sels (2) et ainsi obtenir un flux d'eau purifiée essentiellement dépourvue d'ions Mg^{2+} et Ca^{2+} (2'),

et dans lequel l'unité de traitement électrochimique est une installation d'électrolyse chlore-alcali comprenant :

- un réacteur chlore-alcali (C-A) en communication fluide, d'une part, avec l'unité d'osmose inverse (RO) pour recevoir au moins une partie ledit flux d'eau dessalée (1'), et, d'autre part, avec l'unité de purification (F) pour recevoir au moins en partie ledit flux d'eau purifiée essentiellement dépourvue d'ions Mg^{2+} et Ca^{2+} (2') de sorte à soumettre ces flux (1', 2') à au moins un

champ électrique et ainsi produire ledit flux alcalin (5) comprenant de l'hydroxyde de sodium [NaOH] (5), un flux gazeux de dihydrogène [H₂] (13), et un flux gazeux de chlore [Cl₂] (14) ;

- une cellule à carburant H₂/Cl₂ (FC) en communication fluidique avec le réacteur chlore-alcali (C-A) pour recevoir ledit flux gazeux de dihydrogène [H₂] (13) et ledit flux gazeux de chlore [Cl₂] (14) et ainsi produire un flux concentré d'acide (15) comprenant de l'acide chlorhydrique [HCl], et de l'électricité et/ou de la chaleur ; et

une cuve de dilution (D) agencé pour recevoir un flux liquide (1, 16), de préférence un flux salin, et en communication fluidique avec la cellule à carburant H₂/Cl₂ (FC) de sorte à mélanger ledit flux liquide (1, 16) avec ledit flux concentré d'acide (15) et ainsi produire le flux acide (6) comprenant de l'acide chlorhydrique [HCl].

D'autres avantages et caractéristiques de l'invention apparaîtront à la lecture de la description détaillée ci-après et sur les dessins annexés sur lesquels :

[Fig. 1] montre un organigramme du procédé de l'invention selon un mode préférentiel de réalisation ;

[Fig. 2] montre un organigramme d'un procédé selon un deuxième mode de réalisation de l'invention ;

[Fig. 3] montre un organigramme d'un procédé selon un troisième mode de réalisation de l'invention ;

[Fig. 4] montre un organigramme d'un procédé selon un quatrième mode de réalisation de l'invention ;

[Fig. 5] montre un organigramme d'un procédé selon un cinquième mode de réalisation de l'invention ;

[Fig. 6] montre un organigramme d'un procédé selon un sixième mode de réalisation de l'invention ;

[Fig. 7] montre un organigramme d'un procédé selon un septième mode de réalisation de l'invention ;

[Fig. 8] montre un organigramme d'un procédé selon une variante de l'invention ; et

[Fig. 9] montre un organigramme d'un procédé selon une autre variante de l'invention.

Les figures, tableaux et la description ci-après contiennent, pour l'essentiel, des éléments de caractère certain. Les figures et tableaux font partie intégrante de la description, et pourront donc non seulement servir à mieux faire comprendre la présente invention, mais aussi contribuer à sa définition, le cas échéant.

D'une manière générale, l'invention permet d'augmenter l'alcalinité des eaux de mer et/ou océaniques terrestres. En augmentant l'alcalinité des eaux, celles-ci sont capables de mieux capturer et de mieux stocker de manière permanente du CO₂ atmosphérique.

Ainsi, la présente invention vise un dispositif agencé pour augmenter l'alcalinité des mers et océans. Plus particulièrement, l'invention comporte le déversage d'un flux alcalin dans une eau de mer ou océanique, ci-après eau(x) de mer(s). Ce déversage contribue à restaurer la chimie de l'eau de mer, et notamment son acidité (pH), aux niveaux pré-industriels. On augmente ainsi la capacité des mers et océans à capter, stocker et conserver durablement du CO₂.

La présente invention vise en outre un procédé faisant intervenir l'eau de mer et/ou océanique, de l'électricité et des minéraux (par exemple, du carbonate de calcium) pour obtenir une solution de carbonate de sodium de nature alcaline, ainsi qu'une solution neutralisée. Ces deux solutions, alcaline et neutralisée, peuvent être déversées dans des mers et/ou océans afin d'augmenter leur alcalinité et ainsi de capturer du CO₂. Bien que le procédé de l'invention soit accompagné de la formation intermédiaire de CO₂, le procédé contrôle cette formation et réutilise au moins partiellement ce gaz durant le procédé. Un avantage de l'invention est ainsi que l'équation globale du procédé n'entraîne aucune production de CO₂ néfaste pour l'environnement, ni de déchets polluants.

Un autre avantage est que les matières premières utilisées dans le procédé de l'invention sont naturellement abondantes. Il s'agit en particulier de l'eau de mer, ou plus généralement de saumure, et de CaCO₃. Par conséquent, la logistique est facilitée pour la mise en œuvre du procédé de l'invention.

L'eau de mer particulièrement concernée par l'invention, est notamment celle de la mer Baltique, l'océan antarctique, l'océan indien, l'océan Atlantique, l'océan

Pacifique, la mer méditerranée et/ou la mer rouge. À titre tout à fait indicatif, typiquement 1 kg d'eau de mer comporte environ 964,8 g d'eau (H_2O) et 35,2 g de composés ioniques (principalement des sels). Parmi ces 35,2 g de composés ioniques, on retrouve généralement environ : 19,352 g d'ion chlorure (Cl^-) ; 10,784 g d'ion sodium (Na^+) ; 2,712 g d'ion sulfate (SO_4^{2-}) ; 1,284 g d'ion magnésium (Mg^{2+}) ; 0,108 g d'ion bicarbonate (HCO_3^-) ; 0,412 g d'ion calcium (Ca^{2+}) ; 0,399 g d'ion potassium (K^+) ; et le reste en autre ions ; cf. Zeebe and Wolf-Gladrow, 2001, *CO2 in Seawater: Equilibrium, Kinetics, Isotopes*, Gulf Professional Publishing.

Récemment, l'ajout de carbonate de sodium Na_2CO_3 a été considéré pour augmenter l'alcalinité de l'eau de mer, cf. Hartmann et al., *Stability of alkalinity in Ocean Alkalinity Enhancement (OAE) approaches – consequences for durability of CO_2 storage*, Biogeosciences Discuss., 2022 - DOI : 10.5194/bg-2022-126.

Toutefois, la mise en œuvre d'un procédé à grande échelle avec du Na_2CO_3 présente de nombreuses difficultés à surmonter. Tout particulièrement la synthèse du Na_2CO_3 reste difficile. C'est pourquoi l'état de la technique s'oriente plutôt vers des procédés utilisant des solutions alcalines, telles que les solutions d'hydroxyde de sodium ($NaOH$).

Malgré les difficultés connues, la Demanderesse s'est orientée vers des recherches impliquant du Na_2CO_3 . Une des raisons est que le Na_2CO_3 ne semble pas présenter de risques de sécurité puisque son utilisation est courante en industrie pour l'assainissement de l'environnement ; cf. Brockmann and Janse, 2008, *Calcium and carbonate in closed marine aquarium systems*, *Advances in coral husbandry in public aquariums*, pages 133-142, chapter 14, Burgers' Zoo, Arnhem, The Netherlands.

Ainsi la Demanderesse a mis au point un procédé pour la capture de dioxyde de carbone [CO_2] atmosphérique, comprenant plusieurs opérations. Le procédé de l'invention commence notamment avec des premières opérations comprenant la mise à disposition de produits essentiels pour l'effet technique de l'invention. Ainsi, il est prévu une opération de mise à disposition d'un flux salin d'une part, et la mise à disposition de carbonate de calcium [$CaCO_3$] d'autre part. La mise à disposition du flux salin peut comporter par exemple le puisage d'une eau salée ou la fabrication d'une solution saline par ajout de sels dans de l'eau. De préférence, le puisage d'une eau salée est prévu directement dans une eau de mer, par exemple au moyen

d'une pompe. Le flux salin peut également provenir d'une saumure de mine ou d'usine (flux de saumure industriel), notamment dans le cadre d'une colocalisation du dispositif de l'invention dans une structure d'usine déjà installée. La mise à disposition du CaCO_3 est facilitée par le fait que le CaCO_3 est l'un des minéraux les plus abondants sur notre Planète. En effet, il représente environ 4 % de la croûte terrestre. En particulier, on retrouve le CaCO_3 dans la roche, essentiellement dans la craie, le calcaire et le marbre.

Le procédé comporte également une opération comprenant la production d'un flux alcalin. Dans cette opération, le flux alcalin qui est produit comporte de l'hydroxyde de sodium $[\text{NaOH}]$. Et, le procédé comporte aussi une opération comprenant la production d'un flux acide. Dans cette opération, le flux acide comporte de l'acide chlorhydrique $[\text{HCl}]$. Selon l'invention, ces étapes de production peuvent être réalisées par un traitement électrochimique. Pour cela, le traitement électrochimique est réalisé d'au moins une partie du flux salin fourni auparavant dans l'opération de mise à disposition de celui-ci.

Le procédé de l'invention comprend en outre une opération de neutralisation de l'acide chlorhydrique $[\text{HCl}]$ produit lors de l'opération comprenant la production du flux acide. La neutralisation de l'acide chlorhydrique $[\text{HCl}]$ est réalisée par sa mise en contact dans un réacteur acide (AR) avec le carbonate de calcium $[\text{CaCO}_3]$ mis à disposition durant les premières opérations du procédé. De cette manière, on obtient dans le procédé de l'invention selon le présent mode de réalisation, d'une part, un flux liquide de chlorure de calcium $[\text{CaCl}_2]$ et, d'autre part, un flux gazeux de dioxyde de carbone $[\text{CO}_2]$.

Dans un autre mode de réalisation, l'étape **iv.** de neutralisation de l'acide chlorhydrique $[\text{HCl}]$ prévoit de ne pas donner la priorité à la formation de CO_2 sur la simple dilution en milieu acide du carbonate de calcium $[\text{CaCO}_3]$ en ions Ca^{2+} et CO_3^- .

Ensuite, le procédé comporte une opération comprenant la production d'un flux de carbonate de sodium $[\text{Na}_2\text{CO}_3]$. Pour cela le procédé de l'invention prévoit la mise en contact dans un réacteur basique (BR) du dioxyde de carbone $[\text{CO}_2]$ obtenu lors de la neutralisation (ou le cas échéant un autre gaz contenant du CO_2 provenant d'ailleurs, cf. plus loin) avec l'hydroxyde de sodium $[\text{NaOH}]$ produit lors de l'opération

comprenant la production d'un flux alcalin. De cette manière, on obtient le flux de carbonate de sodium $[\text{Na}_2\text{CO}_3]$.

Finalement, le procédé de l'invention comporte déversage de ce flux de carbonate de sodium $[\text{Na}_2\text{CO}_3]$ dans une eau saline. L'eau saline est une eau de mer et une eau océanique. Ainsi, l'alcalinité de l'eau est augmentée. Cela résulte en la capture accrue de dioxyde de carbone $[\text{CO}_2]$ atmosphérique.

Le déversage peut être réalisé de manière direct ou indirect dans l'eau de mer. Un déversage indirect est notamment un déversage dans un flux d'une usine qui est ensuite acheminé vers la mer pour s'y déverser.

La Figure 1 montre un organigramme d'un procédé selon un mode de réalisation de l'invention.

Dans ce mode de réalisation, le procédé commence lorsqu'un flux d'eau de mer, d'eau océanique, ou plus généralement une saumure 1 entre dans un équipement d'osmose inverse RO. On obtient ainsi un flux d'eau dessalée 1' et un flux d'eau concentrée en sels 2. Ce flux concentré en sels 2 est parfois qualifié de flux "rejeté" comportant des saumures concentrées. Un dispositif d'osmose inverse de la gamme de produit dénommé FilmTec disponible auprès de la société DuPont peut être utilisé.

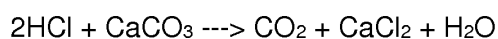
Une partie du flux rejeté 2 est envoyée vers un filtre F qui élimine la plupart des ions Ca^{2+} et Mg^{2+} . Le filtre peut être par exemple un filtre membrane à nanofiltration PRO-XS2 disponible auprès de la société Hydranautics ou FilmTec NF270 disponible auprès de la société Dupont. On obtient ainsi un flux filtré 2' et un flux résiduel 3 comportant sensiblement le restant des ions Ca^{2+} et Mg^{2+} . Ce flux résiduel 3 est rejeté et ainsi les ions Ca^{2+} et Mg^{2+} sont éliminés.

Dans un autre mode de réalisation, le filtre peut être remplacé par un dispositif de précipitation qui élimine la plupart des ions Ca^{2+} et Mg^{2+} .

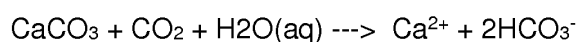
Le flux filtré 2' entre dans un équipement d'électrodialyse ED, ainsi qu'optionnellement une partie de l'eau dessalée lorsque cela est requis par les spécifications de l'équipement d'électrodialyse ED comme dans le cas du présent mode de réalisation. En particulier un équipement d'électrodialyse à trois circuits EDBM disponible auprès de la société PCCell GmbH ou Eurodia peuvent être utilisés.

Trois flux sortent de l'équipement d'électrodialyse ED: (i) un flux partiellement dessalé 4, (ii) un flux alcalin 5 contenant du NaOH, et (iii) un flux acide 6 contenant du HCl. Le flux partiellement dessalé 4 peut être éliminé ou éventuellement valorisé dans des applications diverses, par exemple dans la génération de vapeur. Au besoin, dans un mode de réalisation une partie du flux partiellement dessalé 4 provenant de l'équipement d'électrodialyse ED peut être partiellement ou totalement recirculée dans l'équipement d'électrodialyse ED.

Le flux acide 6 entre dans un réacteur AR qualifié de "réacteur acide". Du CaCO_3 est ajouté au réacteur acide via une voie d'apport 7 pour neutraliser le HCl compris dans le flux d'acide 6. La neutralisation s'effectue selon l'équation suivante :



En plus de cette réaction, il peut avoir une dissolution du carbonate de calcium (et de neutralisation de l'acidité) sans formation de CO_2 ou avec consommation de CO_2 , selon l'équation suivante :



Le réacteur acide et d'autres équipements pour la neutralisation sont notamment décrits dans l'ouvrage Maree et Plessis, 1993 (Kinetics of Calcium Carbonate Neutralization First-Order Case of the Cube-Root Law).

On obtient ainsi un flux liquide 8 de chlorure de calcium [CaCl_2] et un flux gazeux 9 de dioxyde de carbone [CO_2]. Le flux 9 de CO_2 est acheminé vers un réacteur BR, qualifié de "réacteur de base". Le flux alcalin 5 provenant de l'équipement d'électrodialyse entre dans le réacteur de base BR et réagit avec le flux 9 de CO_2 . On obtient un flux 10 de carbonate de sodium [Na_2CO_3]. La réaction principale se produisant dans le réacteur est essentiellement représentée par l'équation suivante :

$$2\text{NaOH} + \text{CO}_2 \rightarrow \text{Na}_2\text{CO}_3 + \text{H}_2\text{O} \text{ (neutralisation partielle du NaOH) ; et ainsi que la dilution éventuelle.}$$

La neutralisation partielle de du NaOH peut-être réalisée dans un injecteur CO_2 disponible auprès de la société Air Liquide. La dilution peut être réalisée dans une cuve de rétention classique. De cette façon, le réacteur de base BR permet de diluer le flux alcalin 5, obtenant un flux 10 avec une concentration élevée de NaOH plutôt que de Na_2CO_3 .

L'opération suivante comporte le déversage de ce flux 10 de carbonate de sodium $[\text{Na}_2\text{CO}_3]$ dans une eau de mer, ou plus généralement le déversage s'effectue dans une eau saline, par voie directe ou indirecte.

Ce procédé peut être réalisé en continu ou par lots (batch), selon ce qui est le plus approprié compte tenu des ressources données (par exemple, eau de mer ou saumure, électricité, CaCO_3).

Par ailleurs, en variante il est possible de contrôler les conditions des opérations pour fixer un temps de séjour dans le réacteur acide AR en vue de réguler la production de CO_2 . Le temps de séjour est ainsi choisi en fonction de la concentration du flux acide 6 et de la taille des particules 7 carbonate de calcium (CaCO_3).

La Demanderesse a envisagé plusieurs variantes du mode de réalisation préférentiel décrit ci-avant. Ceux-ci sont décrits ci-après. Les éléments structurels (équipement(s), dispositif(s), etc.), ainsi que les flux et/ou éléments et/ou formules chimiques et/ou équations portant la même référence numériques ou alphabétiques ou alphanumérique identifient des éléments identiques ou similaires.

La Figure 2 montre un organigramme d'un procédé selon un deuxième mode de réalisation de l'invention.

Dans ce deuxième mode de réalisation du procédé de l'invention, il est prévu de ne pas réaliser d'osmose inverse. Dans ce cas, l'équipement d'électrodialyse ED est agencé de sorte à réaliser l'électrodialyse avec la concentration en NaCl initiale du flux salin (1) mise à disposition en début de procédé. Dans ce mode de réalisation, l'équipement d'électrodialyse ED ne nécessite pas un flux d'eau dessalée (1'). En variante, un flux d'eau dessalée externe (11) provenant d'une autre source peut être mis à disposition. Après l'opération comportant l'électrolyse, le procédé de ce deuxième mode de réalisation est analogue à celui décrit en référence à la figure 1.

La Figure 3 montre un organigramme d'un procédé selon un troisième mode de réalisation de l'invention.

Dans ce troisième mode de réalisation du procédé de l'invention, il est prévu de ne pas réaliser de filtration. Dans ce cas, le flux rejeté 2 concentré en sels, ou au moins une partie de celui-ci, est directement soumis à une électrodialyse, c'est-à-dire que ce entre directement dans l'équipement d'électrodialyse ED. Cela implique que

l'équipement d'électrodialyse ED est agencé pour opérer avec des concentrations en sels de Ca^{2+} et de Mg^{2+} accrues. Pour le reste, le procédé de ce troisième mode de réalisation est analogue à celui décrit en référence à la figure 1.

La Figure 4 montre un organigramme d'un procédé selon un quatrième mode de réalisation de l'invention.

Dans ce quatrième mode de réalisation du procédé de l'invention, il est prévu de filtrer l'eau dessalée 1' sortant de l'équipement d'osmose inverse RO au moyen d'un équipement de filtration supplémentaire F'. Cet équipement de filtration supplémentaire F' est agencé pour éliminer la totalité, ou la quasi-totalité des traces restantes après l'osmose inverse des ions de Ca^{2+} et Mg^{2+} . L'eau dessalée 1' après l'osmose inverse est ainsi conduite dans l'équipement de filtration supplémentaire F'. On obtient ainsi un flux dessalé filtré 1'' lequel est conduit à l'équipement d'électrodialyse ED. L'équipement de filtration supplémentaire F' génère un flux dessalé rejeté 12 dont il est généralement disposé. En variante, le flux dessalé rejeté 12 peut être recirculé vers le réacteur de base BR, comme montré sur la figure 4, en vue de diluer le flux de base 10. Pour le reste, le procédé de ce troisième mode de réalisation est analogue à celui décrit en référence à la figure 1.

La Figure 5 montre un organigramme d'un procédé selon un cinquième mode de réalisation de l'invention.

Dans ce cinquième mode de réalisation du procédé de l'invention, il est prévu une opération de traitement électrochimique pour réaliser un traitement de type chlore-alcali (C-A). Pour cela, il est utilisé un équipement électrochimique produisant en sortie un flux alcalin 5 contenant du NaOH, un premier flux gazeux 13 de dihydrogène (H_2), et un deuxième flux gazeux 14 de chlore (Cl_2). Le flux alcalin 5 est acheminé vers le réacteur basique BR de manière analogue au mode de réalisation décrit en référence à la figure 1. Les premier 13 et deuxième 14 flux gazeux, respectivement de H_2 et de Cl_2 , sont injectés dans une cellule FC à carburant H_2/Cl_2 pour obtenir : un flux concentré d'acide 15 comprenant du HCl et de l'électricité et/ou de la chaleur (optionnellement utilisée pour le procédé). En variante, la cellule FC à H_2/Cl_2 peut être remplacée par un réacteur pour produire du HCl sans production d'électricité.

En particulier, pour ce mode de réalisation on peut utiliser un équipement électrochimique de type Chlor-pack disponible auprès de la société 3V-tech; électrodes pour Chlor-Alkali disponible auprès de la société De Nora et des membranes Chlor-Alkali disponible auprès de la société Nafion.

Le flux concentré d'acide 15 de HCl est acheminé dans un réservoir de dilution D, où il est mélangé à un flux de liquide 16 (par exemple de l'eau de mer ou de la saumure) pour obtenir un flux d'acide 6 qui peut être dilué avec de l'eau de mer. La cuve de dilution est une cuve classique agencée pour recevoir et diluer un ou plusieurs liquides.

Plus généralement, la cuve de dilution (D) est agencée pour recevoir un flux liquide (1, 16), de préférence un flux salin, et plus préférentiellement un flux d'eau de mer. Dans un autre mode de réalisation le flux liquide peut comprendre de l'eau douce, par exemple provenant d'un canal, d'un fleuve, ou encore d'un robinet.

La Figure 6 montre un organigramme d'un procédé selon un sixième mode de réalisation de l'invention.

Dans ce sixième mode de réalisation du procédé de l'invention, il est prévu électrolyse avec un équipement à membrane bipolaire à deux compartiments. On peut notamment utiliser un équipement à deux circuits EDBM disponible auprès de la société MEGA ou Eurodia. En outre, on peut utiliser des paires de cellules CPM-CEM disponible auprès de la société REDstack B.V et des espaceurs "spacers" disponible auprès de la société Aqua Battery B.V.

L'équipement d'électrolyse produit un flux alcalin 5 contenant du NaOH, et un flux acide 6 contenant du HCl.

Contrairement à d'autres modes de réalisations décrits ci-dessus avec d'autres équipements d'électrolyse, dans le présent mode de réalisation il n'est pas généré pas de flux partiellement dessalé 4.

La Figure 7 montre un organigramme d'un procédé selon un septième mode de réalisation de l'invention.

Dans ce septième mode de réalisation du procédé de l'invention, il est prévu une opération comprenant l'introduction d'un flux de liquide 17 (par exemple, de l'eau de mer, de la saumure, partiellement dessalée) dans le réacteur de base BR et le

réacteur acide AR. Cela apporte un contrôle supplémentaire sur ces deux réacteurs (BR et AR).

Dans le mode de réalisation décrits ci-dessus, chaque filtre peut être remplacé par un dispositif de précipitation qui élimine la plupart, voire la totalité, des ions visés.

Par ailleurs on notera que le chlorure de calcium $[CaCl_2]$ généré dans le procédé de l'invention (flux 8) peut être valorisé, notamment dans l'industrie agroalimentaire.

On notera également que la neutralisation du flux acide (HCl) provenant de l'étape de traitement électrochimique permet de mettre le procédé à l'échelle. En effet, sans cette neutralisation de l'acide selon l'invention, il y aurait une génération d'importantes quantités d'acide, ce qui n'est pas soutenable pour mettre le procédé en œuvre à grande capacité et/ou à dans de nombreuses géographies la neutralisation. Si le flux acide n'est pas neutralisé il faudra prévoir de le valoriser ou de l'éliminer, ce qui limite la mise en œuvre du procédé en fonction de la mise à disposition du HCl ou aux possibilités de son élimination. À noter que le transport de HCl peut nécessiter une étape préalable de concentration pour diminuer les coûts de transport. Une telle étape de concentration augmente en revanche les besoins énergétiques du procédé, ainsi que les émissions de CO_2 (notamment associées au transport du HCl). L'efficacité du procédé s'en trouve ainsi affectée. En outre, le transport d'acides est une activité généralement dangereuse, et est limité par des normes de sécurité.

Un effet supplémentaire avantageux du procédé et du dispositif de l'invention, est qu'ils peuvent être utilisés dans divers secteurs industriels (par exemple, chimique, alimentaire, pharmaceutique) pour la production de carbonate de sodium, voire de bicarbonate de sodium.

Dans un mode de réalisation particulier, la Demanderesse a agencé le procédé et le dispositif de sorte à valoriser, au moins en partie, le dioxyde de carbone provenant du réacteur acide AR.

La figure 8 montre un organigramme d'un procédé selon une variante de l'invention. Dans ce mode de réalisation le flux 9 de CO_2 est acheminé vers sa destination finale en vue de sa valorisation. Ce mode de réalisation est notamment intéressant en raison de la pureté du CO_2 généré par le réacteur acide AR. En conséquence, dans

ce mode de réalisation le réacteur de base BR est alimenté en CO_2 via un autre flux de gaz 12. Le flux de gaz 12 comportant le CO_2 peut être un flux pur comportant 100% en CO_2 ou un flux moins pur (air ou fumée industrielle par exemple). Le réacteur de base BR génère alors le flux 10 de carbonate de sodium $[\text{Na}_2\text{CO}_3]$ qui est accompagné en parallèle d'un flux 13 correspondant à l'échappement des éléments restants du flux de gaz 12.

La figure 9 montre un organigramme d'un procédé selon une autre variante de l'invention, dans laquelle le flux 9 de CO_2 provenant du réacteur acide est divisé de sorte à être conduit en partie vers le réacteur basique (BR) et en partie vers sa destination finale en vue d'être valorisé. Optionnellement, la partie du flux 9 conduit vers le réacteur basique (BR) peut rejoindre un flux de gaz 12 moins pur en CO_2 (air). Le réacteur de base BR génère alors le flux 10 de carbonate de sodium $[\text{Na}_2\text{CO}_3]$ qui est accompagné en parallèle d'un flux 13 correspondant à l'échappement des éléments restants du flux de gaz 12.

Ainsi, cette variante de l'invention peut être défini comme suit :

Procédé pour la capture de dioxyde de carbone $[\text{CO}_2]$ atmosphérique, caractérisé en ce qu'il comprend les étapes suivantes :

- a)** La mise à disposition d'un flux salin (1) et de carbonate de calcium $[\text{CaCO}_3]$ (7);
- b)** La production d'un flux alcalin (5) comprenant de l'hydroxyde de sodium $[\text{NaOH}]$; et
- c)** La production d'un flux acide (6) comprenant de l'acide chlorhydrique $[\text{HCl}]$;

et dans lequel, au moins l'une desdites étapes **b)** de production du flux alcalin (5) et **c)** de production du flux acide (6) comporte une étape de traitement électrochimique d'au moins une partie dudit flux salin (1), et en ce que le procédé comprend en outre les étapes suivantes :

- d)** La neutralisation de l'acide chlorhydrique $[\text{HCl}]$ obtenu à l'étape **c)** de production d'un flux acide (6) par la mise en contact dans un réacteur acide (AR) du carbonate de calcium $[\text{CaCO}_3]$ (7) de l'étape **a)** de mise à disposition avec ledit acide chlorhydrique $[\text{HCl}]$ de manière à obtenir un flux liquide (8) de

chlorure de calcium $[\text{CaCl}_2]$ et un flux gazeux (9) de dioxyde de carbone $[\text{CO}_2]$;

e) La production d'un flux de carbonate de sodium $[\text{Na}_2\text{CO}_3]$ (10) par la mise en contact dans un réacteur basique (BR) de dioxyde de carbone $[\text{CO}_2]$, optionnellement obtenu à l'étape **d)** de neutralisation, avec l'hydroxyde de sodium $[\text{NaOH}]$ de l'étape **b)** de production d'un flux alcalin ; et

f) Le déversage du flux de carbonate de sodium $[\text{Na}_2\text{CO}_3]$ (10) produit à l'étape précédente **e)** dans une eau saline choisie parmi une eau de mer et une eau océanique, de sorte à augmenter son alcalinité et ainsi provoquer la capture du dioxyde de carbone $[\text{CO}_2]$ atmosphérique.

Dans la présente description, il est décrit de manière générale que le déversage du flux de carbonate de sodium $[\text{Na}_2\text{CO}_3]$ (10) peut se faire dans une eau saline choisie parmi une eau de mer et une eau océanique. Bien entendu, dans chaque mode de réalisation décrit, le déversage du flux de carbonate de sodium $[\text{Na}_2\text{CO}_3]$ (10), peut se faire de manière directe ou indirecte dans l'eau saline. Le déversage peut ainsi également être réalisé dans une eau saline contenue dans une cuve prévue à cet effet. Toute eau saline peut en effet provoquer la capture du dioxyde de carbone $[\text{CO}_2]$ atmosphérique lorsqu'elle est modifiée au moyen d'un dispositif et/ou du procédé de l'invention. L'invention peut être mise en œuvre à terre ou dans les eaux territoriales (notamment sur plateforme fixe ou mobile).

L'invention utilise du carbonate de calcium $[\text{CaCO}_3]$. Plus particulièrement, et dans le cadre de l'invention, le CaCO_3 provient d'une source, en soi, indépendante du procédé de capture de dioxyde de carbone $[\text{CO}_2]$ atmosphérique. Il s'agit d'une source dite "source tierce". La source tierce du CaCO_3 peut être la roche, la craie, le calcaire et le marbre comme mentionné plus haut. Le CaCO_3 étant l'un des minéraux les plus abondants sur terre, son approvisionnement s'en trouve facilité. La provenance externe au procédé de ce composant est avantageuse, notamment sur le plan du bilan énergétique. En effet, le procédé de l'invention récolte le CaCO_3 dans une source naturelle. Il n'est donc pas nécessaire de le synthétiser par conversion ou synthèse chimique par exemple ce qui généralement génère du CO_2 , ce qui dégrade davantage l'atmosphère et est néfaste pour le bilan énergétique.

L'utilisation de calcaire est notamment rendue possible dans le procédé de la présente invention, sans nécessité de solution de stockage et/ou d'utilisation du CO₂. En particulier, le lien physique existant entre les réacteurs acide (RA) et basique (RB) permet d'acheminer le flux gazeux (9) de dioxyde de carbone et permet l'utilisation directe de calcaire.

L'utilisation des minerais calcaires présente un avantage supplémentaire. En effet, les minerais calcaires présentent un haut niveau de pureté. Ils sont généralement exempts de métaux lourds - notamment de nickel, typique des minéraux silicatés ou des roches contenant du fer réduit (Fe, Fe⁺, Fe²⁺) - qui induisent des impacts négatifs pour les écosystèmes.

Comparé à des approches existantes, le bilan énergétique de l'invention est, entre autres, amélioré par le fait que le procédé augmente l'alcalinité des eaux de mer (appelé en anglais "Ocean Alkalinity Enhancement"). Dans l'art on retrouve essentiellement des méthodes de capture directe de CO₂ dans les eaux de mer (appelé en anglais "Direct Ocean Capture"). Les méthodes de capture directe du CO₂ constituent une approche radicalement différente de la présente invention, notamment en ce qu'elles libèrent du CO₂ des eaux de mer plutôt que de traiter le CO₂ in situ directement dans ces eaux. Les méthodes de capture directe posent ainsi des problèmes de stockage du CO₂ capturé et/ou du traitement de conversion de celui-ci. L'invention évite ces problèmes.

Revendications

[Revendication 1] Procédé pour la capture de dioxyde de carbone [CO₂] atmosphérique, caractérisé en ce qu'il comprend les étapes suivantes :

- i. La mise à disposition d'un flux salin (1) et de carbonate de calcium [CaCO₃] (7);
- ii. La production d'un flux alcalin (5) comprenant de l'hydroxyde de sodium [NaOH] ; et
- iii. La production d'un flux acide (6) comprenant de l'acide chlorhydrique [HCl] ;

et dans lequel, au moins l'une desdites étapes **ii.** de production du flux alcalin (5) et **iii.** de production du flux acide (6) comporte une étape de traitement électrochimique d'au moins une partie dudit flux salin (1), et en ce que le procédé comprend en outre les étapes suivantes :

- iv. La neutralisation de l'acide chlorhydrique [HCl] obtenu à l'étape **iii.** de production d'un flux acide (6) par la mise en contact dans un réacteur acide (AR) du carbonate de calcium [CaCO₃] (7) de l'étape **i.** de mise à disposition avec ledit acide chlorhydrique [HCl] de manière à obtenir un flux liquide (8) de chlorure de calcium [CaCl₂] et un flux gazeux (9) de dioxyde de carbone [CO₂] ;
- v. La production d'un flux de carbonate de sodium [Na₂CO₃] (10) par la mise en contact dans un réacteur basique (BR) d'au moins une partie du dioxyde de carbone [CO₂] obtenu à l'étape **iv.** de neutralisation avec l'hydroxyde de sodium [NaOH] de l'étape **ii.** de production d'un flux alcalin ; et
- vi. Le déversage du flux de carbonate de sodium [Na₂CO₃] (10) produit à l'étape précédente **v.** dans une eau saline choisie parmi une eau de mer et une eau océanique, de sorte à augmenter son alcalinité et ainsi provoquer la capture du dioxyde de carbone [CO₂] atmosphérique.

[Revendication 2] Procédé selon la **revendication 1**, dans lequel la mise à disposition du flux salin de l'étape **i.** est réalisée par le puisage dans une eau choisie parmi une eau de mer, une eau océanique et une saumure industrielle.

[Revendication 3] Procédé selon l'une des **revendications précédentes**, dans lequel l'étape de traitement électrochimique choisie parmi le groupe constitué d'une électrodialyse et électrolyse chlore-alcali.

[Revendication 4] Procédé selon l'une des **revendications précédentes**, dans lequel l'étape **iv.** de neutralisation de l'acide chlorhydrique [HCl] comprend en outre la collecte du flux liquide (8) de chlorure de calcium [CaCl₂].

[Revendication 5] Procédé selon l'une des **revendications précédentes**, comprenant en outre, en amont desdites étapes **ii.** de production d'un flux alcalin (5) et **iii.** de production d'un flux acide, les étapes suivantes :

i.1. Une osmose inverse (RO) pour dessaler ledit flux salin (1) et ainsi obtenir un flux d'eau dessalée (1') d'une part, et un flux d'eau concentrée en sels (2) d'autre part ; et

i.2. Une purification (F), de préférence choisie parmi une filtration et une précipitation, recevant au moins une partie dudit flux d'eau concentrée en sels (2) issue de l'osmose inverse (RO), dans laquelle on élimine des ions Mg²⁺ et Ca²⁺ du flux d'eau concentrée en sels (2) et ainsi obtenir un flux d'eau purifiée essentiellement dépourvue d'ions Mg²⁺ et Ca²⁺ (2').

[Revendication 6] Procédé selon l'une des **revendications précédentes**, comprenant en outre, en amont desdites étapes **ii.** de production d'un flux alcalin (5) et **iii.** de production d'un flux acide, les étapes suivantes:

i.3. Une mise à disposition d'un flux d'eau purifiée essentiellement dépourvue d'ions Mg²⁺ et Ca²⁺ (2'), et

i.4. Une électrodialyse dans laquelle ledit flux d'eau purifiée essentiellement dépourvue d'ions Mg²⁺ et Ca²⁺ (2') est soumis à au moins un champ électrique de sorte à produire ledit flux alcalin (5) et ledit flux acide (6) des étapes **ii.** de production d'un flux alcalin (5) et **iii.** de production d'un flux acide (6).

[Revendication 7] Procédé selon la **revendication 6**, comprenant en outre, en amont de l'étape **i.4.** d'électrodialyse :

i.5. Une mise à disposition d'un flux d'eau dessalée (1', 11), de préférence un flux d'eau dessalée filtrée (1''), également soumis audit champ électrique lors

de l'électrodialyse de sorte à contribuer à la production dudit flux alcalin (5) et dudit flux acide (6) des étapes **ii.** de production d'un flux alcalin (5) et **iii.** de production d'un flux acide (6).

[Revendication 8] Procédé selon l'une des **revendications 1 à 4**, comprenant en outre, en amont desdites étapes **ii.** de production d'un flux alcalin (5) et **iii.** de production d'un flux acide :

i.6. Une purification (F), de préférence choisie parmi une filtration et une précipitation, recevant ledit d'un flux salin (1), dans laquelle on élimine des ions Mg^{2+} et Ca^{2+} dudit d'un flux salin (1) et ainsi obtenir un flux d'eau purifiée essentiellement dépourvue d'ions Mg^{2+} et Ca^{2+} (2') ;

i.7. Une électrodialyse dans laquelle ledit flux d'eau purifiée essentiellement dépourvue d'ions Mg^{2+} et Ca^{2+} (2'), et optionnellement un flux d'eau dessalée (11), est/sont soumis à au moins un champ électrique de sorte à produire ledit flux alcalin (5) et ledit flux acide (6) des étapes **ii.** de production d'un flux alcalin (5) et **iii.** de production d'un flux acide (6).

[Revendication 9] Procédé selon l'une des **revendications 1 à 4**, comprenant en outre, en amont desdites étapes **ii.** de production d'un flux alcalin (5) et **iii.** de production d'un flux acide :

i.8. Une osmose inverse (RO) pour dessaler ledit flux salin (1) et ainsi obtenir un flux d'eau dessalée (1') d'une part, et un flux d'eau concentrée en sels (2) d'autre part ; et

i.9. Une électrodialyse dans laquelle ledit flux d'eau dessalée (1') et ledit flux d'eau concentrée en sels (2) sont soumis à au moins un champ électrique de sorte à produire ledit flux alcalin (5) et ledit flux acide (6) des étapes **ii.** de production d'un flux alcalin (5) et **iii.** de production d'un flux acide (6).

[Revendication 10] Procédé selon l'une des **revendications 5 à 9**, dans lequel l'électrodialyse produit en outre un flux partiellement dessalé (4) lequel est soumis à une deuxième électrodialyse de sorte à contribuer à la production dudit flux alcalin (5) et dudit flux acide (6) des étapes **ii.** de production d'un flux alcalin (5) et **iii.** de production d'un flux acide (6).

[Revendication 11] Procédé selon l'une des **revendications 1 à 4**, dans lequel l'étape **ii.** de production d'un flux alcalin (5) comprend :

- une électrolyse chlore-alcali (C-A) de sorte à produire le flux alcalin comprenant de l'hydroxyde de sodium [NaOH] (5), un flux gazeux de dihydrogène [H₂] (13), et un flux gazeux de chlore [Cl₂] (14) ;

et dans lequel l'étape **iii.** de production d'un flux acide (6) comprend

- une injection dans une cellule à carburant H₂/Cl₂ (FC) dudit flux gazeux de dihydrogène [H₂] (13), et dudit flux gazeux de chlore [Cl₂] (14) de sorte à obtenir un flux concentré d'acide (15) comprenant de l'acide chlorhydrique [HCl], et de l'électricité et/ou de la chaleur ; et
- un mélange dans une cuve de dilution (D) dudit flux concentré d'acide (15) avec un liquide, de préférence un liquide salin (16), de sorte à obtenir le flux acide (6) comprenant de l'acide chlorhydrique [HCl].

[Revendication 12] Dispositif pour la capture de dioxyde de carbone [CO₂] atmosphérique comprenant :

- un moyen de puisage d'un flux salin (1), de préférence une eau de mer ou océanique, et un moyen d'apport de carbonate de calcium [CaCO₃] (7) ;

caractérisé en ce que le dispositif comporte

- une unité de traitement électrochimique (ED, U-CA) apte à produire à partir d'au moins une partie dudit flux salin (1) :
 - o un flux alcalin (5) comprenant de l'hydroxyde de sodium [NaOH] ; et
 - o un flux acide (6) comprenant de l'acide chlorhydrique [HCl] ;
- un réacteur acide (AR) en communication fluidique avec l'unité de traitement électrochimique (ED, U-CA) et relié au moyen d'apport de carbonate de calcium [CaCO₃] (7), pour respectivement recevoir l'acide chlorhydrique [HCl] et le carbonate de calcium [CaCO₃] (7) et les mettre en contact de sorte à neutraliser l'acide chlorhydrique [HCl] et ainsi produire un flux liquide (8) de chlorure de calcium [CaCl₂] et un flux gazeux (9) de dioxyde de carbone [CO₂] ;

- un réacteur basique (BR) en communication fluidique avec l'unité de traitement électrochimique (ED, U-CA) et avec le réacteur acide (AR), pour respectivement recevoir l'hydroxyde de sodium [NaOH] et le dioxyde de carbone [CO₂] et les mettre en contact de sorte à produire un flux de carbonate de sodium [Na₂CO₃] (10) ; et
- un moyen de déversage dudit flux de carbonate de sodium [Na₂CO₃] (10) produit par le réacteur basique (BR) dans une eau saline choisie parmi une eau de mer et une eau océanique, de sorte à augmenter son alcalinité et ainsi provoquer la capture du dioxyde de carbone [CO₂] atmosphérique.

[Revendication 13] Dispositif selon la **revendication 12**, dans lequel l'unité de traitement électrochimique (ED, U-CA) est choisie parmi le groupe constitué d'un électrodialyseur et une installation d'électrolyse chlore-alcali.

[Revendication 14] Dispositif selon l'une des **revendications 12 et 13**, comprenant en outre :

- une unité d'osmose inverse (RO) agencée pour recevoir le flux salin (1) de sorte à le dessaler et ainsi produire un flux d'eau dessalée (1') d'une part, et un flux d'eau concentrée en sels (2) d'autre part ; et
- une unité de purification (F) en communication fluidique avec l'unité d'osmose inverse (RO) pour recevoir au moins une partie dudit flux d'eau concentrée en sels (2) et agencée pour éliminer des ions Mg²⁺ et Ca²⁺ dudit flux d'eau concentrée en sels (2) et ainsi obtenir un flux d'eau purifiée essentiellement dépourvue d'ions Mg²⁺ et Ca²⁺ (2').

[Revendication 15] Dispositif selon l'une des **revendications 12 à 14**, comprenant en outre :

- un moyen d'apport d'un flux d'eau purifiée essentiellement dépourvue d'ions Mg²⁺ et Ca²⁺ (2'), et dans lequel
- l'unité de traitement électrochimique est un électrodialyseur (ED) agencé en communication fluidique avec le moyen d'apport du flux d'eau purifiée essentiellement dépourvue d'ions Mg²⁺ et Ca²⁺ (2') de sorte à soumettre ce flux (2') à au moins un champ électrique et ainsi produire ledit flux alcalin (5) et ledit flux acide (6).

[Revendication 16] Dispositif selon la **revendication 15**, comprenant en outre :

- un moyen d'apport d'un flux d'eau dessalée (1', 11), de préférence un flux d'eau dessalée filtrée (1''), et dans lequel
- l'électrodialyseur (ED) est également agencé en communication fluidique avec le moyen d'apport d'un flux d'eau dessalée (1', 11, 1'') de sorte à soumettre ce flux audit champ électrique pour produire le flux alcalin (5) et le flux acide (6).

[Revendication 17] Dispositif selon la **revendication 12**, comprenant en outre :

- une unité d'osmose inverse (RO) agencée pour recevoir le flux salin (1) de sorte à le dessaler et ainsi produire un flux d'eau dessalée (1') d'une part, et un flux d'eau concentrée en sels (2) d'autre part ; et dans lequel
- l'unité de traitement électrochimique est un électrodialyseur (ED) agencé en communication fluidique avec, d'une part, au moins une partie dudit flux d'eau dessalée (1') et, d'autre part, au moins une partie dudit flux d'eau concentrée en sels (2), de sorte à les soumettre à au moins un champ électrique pour produire ledit flux alcalin (5) et ledit flux acide (6).

[Revendication 18] Dispositif selon la **revendications 12**, comprenant en outre :

- une unité d'osmose inverse (RO) agencée pour recevoir le flux salin (1) de sorte à le dessaler et ainsi produire un flux d'eau dessalée (1') d'une part, et un flux d'eau concentrée en sels (2) d'autre part ; et
- une unité de purification (F) en communication fluidique avec l'unité d'osmose inverse (RO) pour recevoir au moins une partie dudit flux d'eau concentrée en sels (2) et agencée pour éliminer des ions Mg^{2+} et Ca^{2+} dudit flux d'eau concentrée en sels (2) et ainsi obtenir un flux d'eau purifiée essentiellement dépourvue d'ions Mg^{2+} et Ca^{2+} (2'),
et dans lequel l'unité de traitement électrochimique est une installation d'électrolyse chlore-alcali comprenant :
 - un réacteur chlore-alcali (C-A) en communication fluidique, d'une part, avec l'unité d'osmose inverse (RO) pour recevoir au moins une partie ledit flux d'eau dessalée (1'), et, d'autre part, avec l'unité de purification (F) pour recevoir au moins en partie ledit flux d'eau purifiée essentiellement dépourvue

d'ions Mg^{2+} et Ca^{2+} (2') de sorte à soumettre ces flux (1', 2') à au moins un champ électrique et ainsi produire ledit flux alcalin (5) comprenant de l'hydroxyde de sodium [NaOH] (5), un flux gazeux de dihydrogène [H_2] (13), et un flux gazeux de chlore [Cl_2] (14) ;

- une cellule à carburant H_2/Cl_2 (FC) en communication fluidique avec le réacteur chlore-alcali (C-A) pour recevoir ledit flux gazeux de dihydrogène [H_2] (13) et ledit flux gazeux de chlore [Cl_2] (14) et ainsi produire un flux concentré d'acide (15) comprenant de l'acide chlorhydrique [HCl], et de l'électricité et/ou de la chaleur ; et
- une cuve de dilution (D) agencé pour recevoir un flux liquide (1, 16), de préférence un flux salin, et en communication fluidique avec la cellule à carburant H_2/Cl_2 (FC) de sorte à mélanger ledit flux liquide (1, 16) avec ledit flux concentré d'acide (15) et ainsi produire le flux acide (6) comprenant de l'acide chlorhydrique [HCl].